

УДК 669.15

А. А. Куikliна, Ю. В. Юдин, П. Д. Лебедев, М. В. Майсурадзе *

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

* *m. v. maisuradze@urfu.ru*

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ БЕЙНИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методом имитационного моделирования фазового превращения в твердом состоянии определены основные факторы, влияющие на кинетику изотермического бейнитного превращения в легированных сталях. Показано, что на параметры процесса бейнитного превращения оказывает значимое влияние первоначальная конфигурация расположения зародышей новой фазы в объеме металла.

Ключевые слова: сталь, бейнит, кинетика, моделирование, изотермическое превращение, уравнение КДМА, уравнение Остина — Риккета

A. A. Kuklina, Yu. V. Yudin, P. D. Lebedev, M. V. Maisuradze

DETERMINATION OF THE FEATURES OF THE BAINITE TRANSFORMATION IN STEELS BY MEANS OF THE COMPUTER SIMULATION

The main factors affecting the kinetics of isothermal bainite transformation in alloyed steels are determined using algorithms of the computer simulation of solid state phase transformation. It is shown that the initial configuration of the new phase nuclei in the metal volume has a significant effect on the bainite transformation parameters.

Key words: steel, bainite, kinetics, simulation, modeling, isothermal transformation, JMAK equation, Austin — Rickett equation

Объектом исследования в настоящей работе являются легированные стали 25Г2С2Н2МА [1], 50ХМФА [2]. Математическое описание наблюдаемой кинетики изотермического превращения было осуществлено при помощи уравнения (1) Колмогорова — Джонсона — Мела — Аврами (КДМА) [3] и уравнения (2) Остина — Риккета (ОР) [4].

$$P = 1 - \exp(-k\tau^n), \quad (1)$$

$$P = 1 - (k\tau^n + 1)^{-1}, \quad (2)$$

где P — доля превращения аустенита, τ — время (с), k — температурно-зависимый коэффициент, n — показатель степени.

Имитационное моделирование фазового перехода было реализовано в программной среде MATLAB. Более подробно методика моделирования описана в работе [5].

Отмечено, что на кинетических кривых бейнитного превращения, построенных в координатах уравнения КДМА, в основном наблюдается перегиб, характеризующийся изменением показателя степени n уравнения (1). Исключение составляет случай образования верхнего бейнита в стали 50ХМФА (рис. 1, а): здесь кинетическая кривая в логарифмических координатах уравнения КДМА имеет вид, близкий к линейному. В свою очередь, кинетические кривые в логарифмических координатах уравнения ОР практически всегда имеют линейный вид, за исключением образования верхнего бейнита в стали 50ХМФА при температуре 420 °С (рис. 1, б).

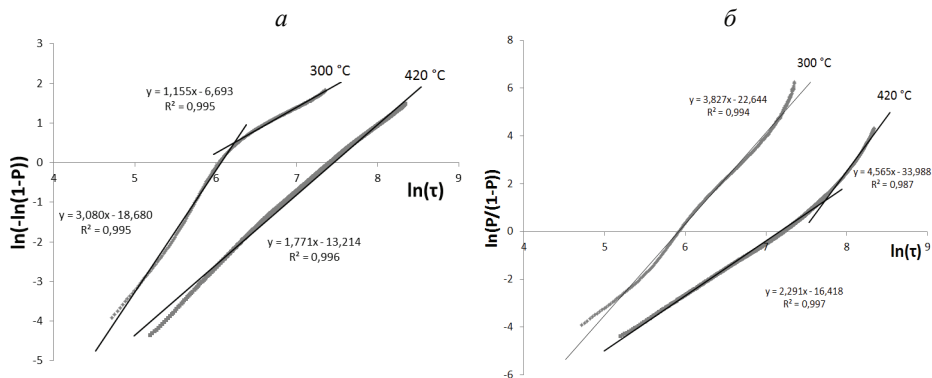


Рис. 1. Кинетические кривые изотермического бейнитного превращения в логарифмических координатах для стали 50ХМФА:
а — уравнение КДМА (1); б — уравнение ОР (2)

Анализ результатов имитационного моделирования показал, что описание кинетики фазового перехода при помощи уравнения КДМА в случае равномерно расположенных зародышей имеет вид, близкий к линейному в логарифмических координатах, а в случае неоднородно-

го распределения зародышей в объеме куба появляется перегиб на кинетической кривой. При этом кинетические кривые в логарифмических координатах уравнения ОР обладают прямо противоположными характеристиками (рис. 2).

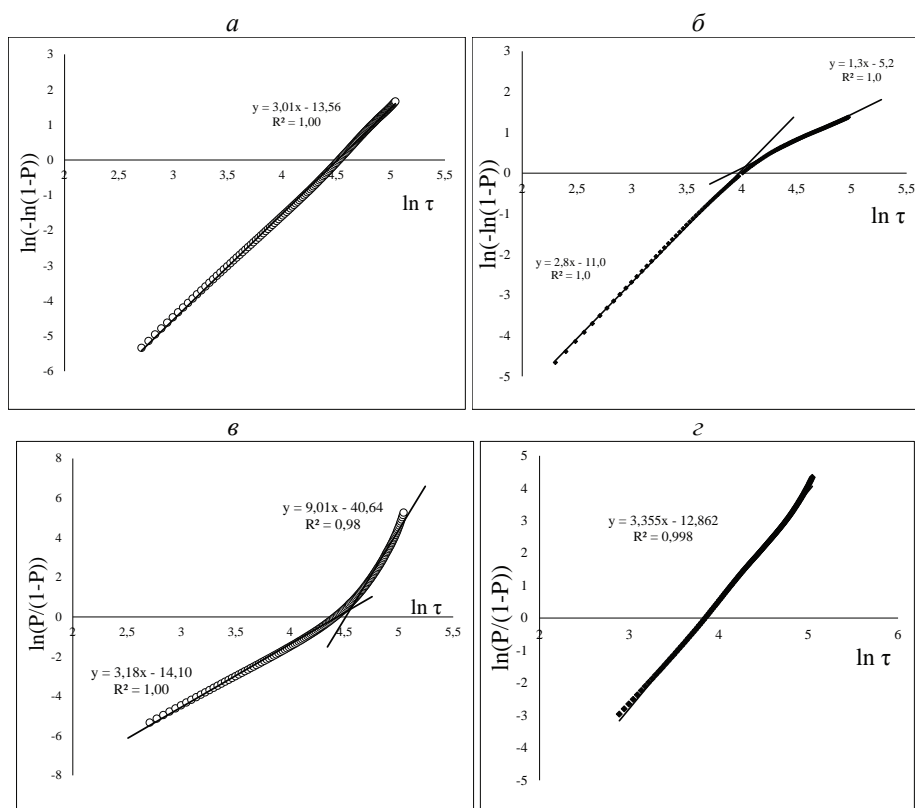


Рис. 2. Кинетическая кривая фазового перехода, полученного в результате имитационного моделирования при начальном расположении зародышей новой фазы в координатах КДМА (*a*, *б*) и в координатах ОР (*в*, *г*):

a — в объеме куба случайным образом; *б* — в объеме куба с градиентом концентрации

Таким образом, характер бейнитного превращения в стали обусловлен конфигурацией распределения в объеме аустенита зародышевых центров, способных к росту при конкретной температуре изотермической выдержки.

Литература

1. Майсурадзе М. В., Юдин Ю. В., Куклина А. А. Повышение ударной вязкости при формировании бейнитной структуры в высокопрочной стали HY-TUF // *Металлург*. 2019. № 8. С. 69–76.
2. Maisuradze M. V., Yudin Yu. V., Kuklina A. A. A Novel Approach for Analytical Description of the Isothermal Bainite Transformation in Alloyed Steels // *Materials Performance and Characterization*. 2019. V. 8. № 2. P. 80–95.
3. Avrami M. Kinetics of phase change I. General theory // *Journal of Chemical Physics*. 1939. V. 7. P. 1103–1112.
4. Austin J. B., Rickett R. L. Kinetics of the Decomposition of Austenite at Constant Temperature // *Transactions of American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*. 1939. V. 964. P. 1–20.
5. Simulation of Isothermal Austenite Transformation in Steel / Yu. V. Yudin [et al.] // *Steel in Translation*. 2018. V. 48. № 10. P. 684–689.